蛍光ランプの特性改善[†]

専門会員 神谷 茂*

1. ま え が き

蛍光ランプが発明されてから半世紀近く経過し、その間多くの研究開発により品質向上がはかられて来た。蛍光ランプはもともと高効率の上に、長年の改良によってその効率は逐次向上してきたので、高効率光源の最右翼の光源として位置づけられてきたが、1970年ごろにはその効率もほぼ飽和の傾向を示してきた。しかしながら、石油ショックを契機とする省エネルギーへの社会的ニーズの高まりと、このニーズを満たすための新しい技術開発によって、蛍光ランプは、ふたたび新しい効率向上の歩みを力強く始めている。これらの新しい技術開発は、ハード面では蛍光ランプの設計要因の見直しによる放電特性の改良と、新しい高効率希土類蛍光体の開発、さらにはエレクトロニクス技術の応用である。それとともに最近の進歩をささえている大きな技術要素がソフト面での新しい研究成果である。人間の目の色覚に関する研究、演色性と視感的な明るさ感覚の関係など一連の人間の生理、心理面にまで及んだ研究成果が、新しい蛍光ランプの開発に大きな役割を果たしていることが特筆されなければならない。

本資料では、最近の蛍光ランプの効率改善の中心的役割を果たしている、いわゆる省電力形蛍光ランプと3波長蛍光ランプの現状と展望について述べる。また後者に関連して行なわれている蛍光ランプの光源色の見直し、演色性区分の再編成についても多少ふれておく。

2. 管径、封入ガスなどによる蛍光ランプの高効率化

この10年間、省エネルギー指向に呼応して消費電力の低減と効率の向上をはかった、いわゆる省電力形蛍光ランプの特性改善に努力がはらわれてきた。当初は従来の安定器にそのまま使用可能なものの開発が進められた。しかしながら、この方法では改善に限度があるところから、最近では新しい安定器との組み合わせによる総合特性の改善への取り組みが活発になってきている。

2.1 従来の安定器との組み合わせ可能なランプでの改善

従来の安定器を用いて蛍光ランプの消費電力を低減させるためには、重い希ガスを封入することが有効な手段である¹⁾。従来のアルゴンに代えて原子量が大いクリプトンやキセノンなどの重い希ガスを用いると、陽光柱での電子と希ガスの弾性衝突損失、および電子と水銀イオンの管壁への損失が少なくなって陽光柱電界が低下し²⁾、また電離電圧が低い陰極降下も低下する³⁾。その結果、ランプ電圧が低下し、ランプ電力も低下する。しかし陽光柱での発光効率の上昇はそれほど大きくない⁴⁾。したがって従来のランプと同じ光出力を得るためには、さらに発光効率を高める必要がある。

一方、都合のよいことに重い希ガスを用いると、陰極上のエミッタの消耗が少なくなるため⁵⁾、封入ガス圧力を低下させることができ、発光効率の向上が可能となる。一般的に封入ガスが重いほど、混合ガスの場合はその平均原子量が大いほど⁶⁾ランプ電力の低下率が大きくなる。またエミッタの消耗率も小さくなるため、封入ガス圧力をより低くすることができ、ランプ効率の向上も大きくなる。しかしながら、このようなガスを用いるとランプ特性上の不都合も生ずる。その一つはランプ電流の増加である。これは安定器での電力損失の増加や、特に進相形安定器では直列コンデンサの電圧上昇をもたらし、耐圧上問題となる場合がでてくる。さらに周囲温度が低い場合、従来のアルゴン封入ランプに比較して始動電圧が上昇すること、点灯直後の移動縞の発生¹⁾、安定点灯に至るまでに長時間を要すること、常温時における光束に比して、その低下率が大きいことなどの不都合を生じる。始動電圧の上昇はアルゴンに比べ、クリプトンやキセノンは水銀とのペニング効果が小さく、放電開始電圧が上昇することに基因する。光出力の不安定性や常温時におけるよりも光出力が大幅に低下するのは、希ガス放電への転移温度が重いガスほど高いため⁷⁾であり、安定時間が長くなるのはガスの熱伝導度が小さいためと考えられる。これらの不都合は、封入ガスが重いほどすなわち平均原子量が大いほど深刻となる。したがって具体的なランプ設計にあたっては、得られる性能改善とこれらの不都合を総合的に考慮して、封入ガス組成が

[†] Improvements of Efficacy and Color Rendering of Fluorescent Lamp

* 松下電子工業㈱

Shigeru Kamiya

決められている。

ラピッドスタート形については、このような考えに基づく蛍光ランプは1974年に米国で最初に開発され、翌年日本においても製品化された⁹⁾。封入ガスとしてはクリプトン混合ガスが用いられている。特に1.2 m 長の40 W サイズランプでは、当初始動電圧の上昇が問題となったが、内面導電被膜による始動補助効果の改善によって解決されている⁹⁾。消費電力の節減はランプや安定器の種類によって異なるが約7%である。

スイッチスタート形の場合は、重い封入ガスの採用と管径の縮少の組み合わせによって、効率の向上がはかられた¹⁰⁾。管径の縮少は放電開始電圧の上昇をもたらすが、スイッチスタート形では、グロースタータのキック電圧を利用して始動する方式が大半であり、そのキック電圧が比較的高いために、重い封入ガスと組み合わせてもその始動電圧はそれほど上昇しない。管径が細くなるとランプ効率が上昇するのは、ランプ電力が発光に有効な陽光柱電力へ効率よく変換されるためである。ランプ長の短いものほどより細い管径が有利となる。

スイッチスタート形用の安定器は遅相形が主体で、電流の増加による安定器での電力損失の増加が大きい。したがってランプ電流を増加させないことが、スイッチスタート形ランプでは重要な設計要件であり、重い封入ガスと細い管径の組み合わせは、きわめて有効な手段といえる。

このような考えに基づいて、クリプトン混合ガスと27～29 mm 管径を用いた蛍光ランプが、日本でも実用化された¹¹⁾¹²⁾。管径の相違は、上述のようなランプ効率の上昇と付随する不都合さのバランスの考え方によるものであったが、ランプの標準化を進める上で問題となり種々討議されたが、改正 JIS¹³⁾では直管形の標準値は28 mm、環形は29 mm に定められ、この管径に統一されつつある。欧州においては、25.5 mm 管径と後述する3波長形蛍光体を用いることにより、1.2 m の40 W サイズで10%のランプ電力の低下と、92 lm/W の効率のランプが製品化されている¹⁴⁾。

表 1 省電力を目的とした主な蛍光ランプの特性

	種 類	ランプ長 (mm)	ランプ径 (mm)	ランプ 電 力 (W)	ランプ電流 (A)	ランプ電圧 (V)
直 管 形	ラピッドスタート形	1,198	32.5	36	0.440	96
		2,367	38.0	100	0.820	142
	スタータ形	580	28.0	18	0.350	59
		1,198	28.0	37	0.410	108
環 形		(167*)	29	28	0.600	55
		(241*)	29	30	0.425	83
		(315*)	29	38	0.425	103

* 環内径の値。

2.2 新しい安定器との組み合わせによる改善

安定器が従来そのまま、ランプの性能改善を行なう場合、当然ランプ設計の自由度は低下する。従来のランプと

あまり変わらないランプ電流やランプ電圧、ほぼ同等の始動性能が要求されるため、管径や封入ガス組成が限定されるからである。したがってさらに大幅なランプの性能改善を得るためには、新しい安定器と組み合わせ、システムとしての開発を行なう必要がある。

米国で最初に、ラピッドスタート形の省電力形蛍光ランプ専用2灯直列形安定器が開発された¹⁵⁾。クリプトン混合ガス封入ランプに対して、二次電圧のピーク値と実効値の最適化などを行ない総合効率を改善したものである。その効率向上は、新しい高効率蛍光体の採用による効果も含めて、従来の一般形のランプ・安定器システムに比べて19%に及ぶと報告されている。また40 W サイズのランプを28 W で点灯し、始動後は予熱回路をカットオフする新安定器を用いて、従来のシステムに比し39%の総合効率の向上が得られている¹⁶⁾。一方、管径の縮少によるランプ効率の増加をラピッドスタート形にも利用するために、25.5 mm 径ランプが点灯できる専用ラピッドスタート形安定器が開発された。ランプ電力は32 W で、3波長形蛍光体を用いて総合効率の上昇は32%と報告されている¹⁷⁾。

蛍光ランプを高周波で点灯すると、電極損失が低下するためランプ効率が大幅に向上し、またインダクタンスやキャパシタンスを小さくできるため、安定器での電力損失も低下できる。すなわちランプと安定器の両者の効率が向上し、総合効率が向上するので、高周波点灯はきわめて有望な効率向上の手段である。最近、25.5 mm 管径と3波長形蛍光体を用いた専用ランプを40～50 kHz の高周波で点灯する新しいシステムが開発され、1.2 m 長ランプで100 lm/W の総合効率が得られている¹⁸⁾¹⁹⁾。表 2 は発表されたデータをまとめたものである。今後このような高周波点灯による専用ランプと専用安定器の組み合わせによる効率向上の研究が、ますます活発になっていくものと考えられる。

表 2 高周波点灯新システムと従来システムの比較 (2灯用)

システム	ラ ン プ	安 定 器	全 光 束 (lm)	入力電力 (W)	総合効率 (lm/W)
新システム	新ランプ	新安定器	6,000	60	100
	省電力形*	電子安定器	6,000	72	83
従来システム	省電力形*	省電力形*	6,000	78	77

* ラピッドスタート形で省電力を目的としたもの。

3. 3波長形蛍光ランプ

3.1 3波長形蛍光ランプの開発経過

3波長形蛍光ランプの誕生は、蛍光ランプの歴史の中で特筆すべき技術革新である。このランプによって蛍光ランプの効率はさらに大きく向上する可能性がでてきた。その特長ある分光分布と演色について、多くの色彩研究者、照明技術者が、新しい研究対象としてとりあげるようになり、従来計算でしか推測できなかった人間の色覚に関する研究が実験的に確かめられるようになった。その結果、すでに多くの新しい知見が得られている。これらの研究成果

は、すでに本学会誌にも数多く発表されている²⁰⁾²¹⁾。3波長形蛍光ランプを生み出した視覚生理に関する研究や、ランプ開発の歴史的な経過についても、すでに多くの総説や資料が発表されている²⁰⁾²²⁾ので、詳細はそれらに譲ることとし、ここではその概要だけを述べる。

自然界に存在する光は、いずれも連続した分光分布をもっている。したがって、これまで人工光源の演色性を高めるには、いかにしてその分光分布を自然光のそれに近づけるかという点に努力がはらわれてきた。この考え方は、光源の演色性評価数の求め方にも反映されている。この考え方に基づく限り、演色性を改善しようとするれば、光のエネルギーを視感度の低い可視域の両端の波長領域へも分配することになり、ランプ効率は低下せざるを得ない。

しかしながら、1970年以降、色覚に関する研究が進み、その結果、人間の目の感度が光の波長によって大きく変わるように、色彩を見分ける色覚も特定の波長に大きく左右されることが明らかにされた。

その結果450, 540および610 nm 付近の三つの波長をピークとする比較的狭い波長域に強い色覚反応があり、この波長域のエネルギーだけを組み合わせた光で照明すると、あらゆる色彩がすべて見えることが確かめられた。Thornton²³⁾や Koedam²⁴⁾らは、この波長域だけに発光エネルギーをもつランプを想定し、演色評価数を計算した結果、 R_a は85にも達することを明らかにした。これにより、演色改善のためには、可視域のできる限り広い範囲に発光エネルギーを分布させるといった従来の考え方がくつがえされ、高効率、高演色性を両立させた蛍光ランプの可能性が明らかにされた。

この結果に基づいて、Thornton はピーク波長 447 nm (原報文では、平均波長 451 nm) の $3\text{Sr}_4(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{SrCl}_2 : \text{Eu}^{2+}$, 525 nm (平均波長 537 nm) の $\text{Zn}_2\text{SiO}_4 : \text{Mn}^{2+}$ および 611 nm (平均波長 621 nm) の $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ 蛍光体の組み合わせにより、4200 K の色温度で R_a 83 のランプを得ている²⁵⁾。

しかしながら、3波長形蛍光ランプの真の実用化は、Verstegen らによって開発された一連の新希土類蛍光体の適用から始まった。Thornton が用いた緑色発光の $\text{Zn}_2\text{SiO}_4 : \text{Mn}^{2+}$ 蛍光体は、古くからある蛍光体ではあるが、蛍光ランプ用としては働程特性が良くなく、この蛍光体を一般照明用蛍光ランプの主成分とすることには、いささか無

理があった。Verstegen らによって開発された希土類付活アルミン酸塩蛍光体²⁶⁾は、きわめて安定で高い量子効率をもっている。青色発光用として $\text{BaMg}_2\text{Al}_6\text{O}_{27} : \text{Eu}^{2+}$, 緑色発光用として $\text{CeMgAl}_9\text{O}_{19} : \text{Tb}^{3+}$, 赤色発光用として $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ を用いた3波長形蛍光ランプは、2500 から 6500 K の色温度範囲で、83以上の R_a とハロリン酸カルシウム蛍光体を用いた標準形の白色蛍光ランプと同等のランプ効率を有している²⁷⁾。

図2 Verstegen らによる3波長形蛍光ランプの分光分布

図1, 図2に Thornton らによる3波長形と, Verstegen らによるものの分光分布を示した。

3.2 日本における3波長形蛍光ランプ

欧州においては、3波長形蛍光ランプはほぼ従来の演色改善形ランプの色温度系列に従って製品化された。現在 2700, 3000, 4000, 6000 K の電球色、温白色、白色および昼光色タイプが販売されている。

一方、日本においては3波長形蛍光ランプの特長を生かし、従来系列のランプとの差別をはっきりさせる目的もあって、最初に色温度 5000 K で製品化された²⁸⁾。この色温度のランプは白色感にすぐれ、かつ明りょう感 (Visual Clarity) も高く、また日本人の好みにあった色調であったことから、日本における3波長形蛍光ランプの標準タイプとなり、JIS にも記載されるようになった¹³⁾。さらに 5000 K 3波長形蛍光ランプのもつさわやかな光色感と照明器具を美しく見せる効果が、昼白色蛍光ランプ²⁹⁾を生む

図1 Thornton らによる3波長形蛍光ランプの分光分布

図3 5000 K 3波長形蛍光ランプの分光分布例

きかけとなった。5000 K 以外の色温度のランプとしては、特に低色温度における高効率、高演色性の特長を生かして、電球色タイプが主としてコンパクトな高輝度の蛍光ランプ³⁰⁾に普及しつつある。

図 3、図 4 に、代表的な5000と2800 K の3波長形蛍光ランプの分光分布を示した。

図 4 2800 K 3波長形蛍光ランプの分光分布例

3.3 3波長形蛍光ランプの特長

3波長形蛍光ランプは、単に測光上の光束値が高く、また演色計算上の演色評価数が高いだけでなく、実際にこのランプで照明したときに、従来のランプとは異なったいくつかの特長ある照明効果をもたらす。これらはいずれも、その特異な分光分布に基因するものである。3波長形蛍光ランプの照明特性についてもすでに多くの報文がある²⁰⁾²¹⁾ので詳細はさけるが、主要点だけ列記しておく。

その第1は、標準形の白色蛍光ランプと比較して有彩色空間において同一の明るさ感覚を得るのに必要な照度レベルが低くて済むということである。この値は対象物体色によって多少異なるが、白色蛍光ランプ1に対してほぼ0.7であることが多くの実験者によって確かめられている。このため同一照度では、3波長形蛍光ランプで照明するとかなり明るく感じることになる。この効果は3波長形に限らず、演色性のすぐれた蛍光ランプで一般的に認められる効果³¹⁾であるが、従来の高演色性蛍光ランプではそのランプ効率が大幅に低下するために、実用上大きな効果を認められるに至らなかったが、3波長形蛍光ランプではランプ効率も高いので、この効果が特筆されるようになった。

第2の効果は、物体色を鮮やかに好ましく演色することである。これは平均演色評価数 R_a を求めるのに使用する8種類の色標を3波長形蛍光ランプで照明したとき、それらの色標のUV座標系での色度点を結んだ図形の面積が、白色蛍光ランプで照明した場合よりも大きく、EDL形蛍光ランプで照明したときに匹敵する色域をもっていることと深いつながりがあるものと思われる。図5にその一例を示した。演色の好ましさを表わす指数は数多く提案されているが、多くの指数で3波長形蛍光ランプは高い評価を得ている³²⁾。もちろんこれらの指数は、適切な分光分布設計を行なったランプに対するものであり、分光分布が変わ

図 5 各種光源の照明下における R_a 評価用試験色の色度点

ればこれらの値は当然変わってくる。

第3は、演色の好ましさと多分に関係があるとみられるが、3波長形蛍光ランプで照明すると物体が鮮明にあるいは澄んで見える効果があることである。これについては、色覚強度の大きい特定の3波長以外に深い谷をもった分光分布からくる特長的な効果と考えられ、Thornton が Visual Clarity と呼んだ概念と類似のものと考えられるが、その実態についてはさらに解明のための実験、研究が必要である。

3.4 3波長形蛍光ランプの最適分光分布設計

すでに述べたように、平均演色評価数80以上の得られる3波長の組み合わせは、およそ450, 540, 610 nm 付近であることが明らかになったが、実際の蛍光ランプでは、蛍光体からの発光のほかに、水銀輝線の存在をまず考慮しなければならない。

Opstelten らは³³⁾、水銀輝線の影響を考慮に入れて、465, 545および615 nm の3波長付近にピークをもち、かつ緑色域は比較的ブロードな分光分布で、他は単色光に近いものの組み合わせで、効率がおおよそ80 lm/W、 R_a 90以上の蛍光ランプが実現することを予測した。しかしながら現在実用可能な蛍光体を考えると、赤色発光用としては611 nm にピークにもつ $Y_2O_3:Eu^{3+}$ に限られており、また緑色発光用としては、後述するように各種の蛍光体が開発されているが、いずれも Tb^{3+} の発光であって、その分光分布はサブバンドに微妙な違いがあるものの、その主ピーク波長はおおよそ543 nmにあるシャープな発光である。

一方、青色発光を受け持つ蛍光体は、いずれも Eu^{2+} の発光に基づくものであるが、 Eu^{2+} の発光はその母体組成によって分光分布が大きく変化する。したがって、青色発光の蛍光体の選択は、3波長形蛍光ランプの演色性、および効率に大きな影響を与える。 Eu^{2+} 付活アルカリ土類クロアパタイト蛍光体では、その成分組成によって発光のピーク波長や半値幅が変わり、これらが3波長形蛍光ランプに用いたときに演色性および効率に影響を与える³⁴⁾。また Eu^{2+} 付活アルミニウム酸バリウム・マグネシウム蛍光体に

図 6 青色成分として BaMg-Aluminate:Eu 蛍光体を用いた場合の蛍光体発光ピーク波長と 5000 K 3 波長形蛍光ランプの R_a と光束の関係

においても、その成分組成により発光ピーク波長が変わり、図 6 に示すように、ランプ効率と平均演色評価数に影響を与える³⁵⁾。3 波長形蛍光ランプはさきに述べたように、広い色温度の範囲で高効率と良好な演色性を両立させるが、狭い範囲ではやはり演色性を向上させようとするれば、ランプ効率を若干犠牲にせざるを得ず、両者のバランスをとった分光分布の最適化設計が必要になってくる。

青、緑、赤の主発光蛍光体の分光分布設計のほかに、二層塗布方式も検討に値する分光分布設計要素である。この方式は、本来高価な希土類蛍光体の使用を節減する目的で検討された技術であり、第一層には通常安価なハロリン酸カルシウム蛍光体がいわれているが³⁶⁾、適切な第一層蛍光体を選ぶことにより、演色性が改善されることが報告されている³⁷⁾。さらに最適化された分光分布をもつ第一層蛍光体の採用と塗布技術の改良により、効率および演色性の一層の改善が期待できる。

実際に存在している蛍光体を用いての検討のほかに、3 成分以上を含めて、狭帯域発光の組み合わせにおけるコンピュータシミュレーションによる分光分布と演色性、ランプ効率との検討もさかに行なわれている³⁸⁾。実際に現在 3 波長形蛍光ランプと称されているものも、すべて 490 nm 付近に Tb^{3+} のサブピークをもっており、これが R_a を高めていることは確かである²¹⁾。4 波長以上の組み合わせに関するこれらの研究成果は、将来の新蛍光体開発の重要な指針になるものと考えられる。

分光分布によって、色度点や演色評価数は一義的に決まってしまうが、同じ演色評価数であっても色温度によってその視感的な好ましさはかなり変わってくる。

図 7 は、 $Y_2O_3:Eu^{3+}$, $CeMgAl_{11}O_{19}:Tb^{3+}$, および $BaMg_2Al_{16}O_{27}:Eu^{2+}$ 蛍光体の組み合わせで得られる色温度の等 R_a 線を示したものであるが³⁹⁾、同じ R_a であっても、色度点によって視感的な評価には差が生じてくることが認められている。

図 7 $Y_2O_3:Eu^{3+}$, $CeMgAl_{11}O_{19}:Tb^{3+}$ および $BaMg_2Al_{16}O_{27}:Eu^{2+}$ の組み合わせにより得られる等 R_a 曲線

図 8 主観評価実験により好ましい演色を与える色度範囲例

図 8 はその一例を示したもので、日本人の肌色に対して好ましい演色を与える色度点は、比較的狭い領域にあることがわかる。したがって 3 波長形蛍光ランプの分光分布設計にあたっては、単に測色計算値だけに頼らずに、適切な実験方法に基づいた主観の評価がきわめて重要である。

3.5 3 波長形蛍光ランプ用蛍光体

3 波長形蛍光ランプや、その他の狭帯域発光形蛍光ランプの特性改善をはかるためには、新蛍光体の開発、既存希土類蛍光体の改良が必須である。そのため、最近この分野の研究開発がとみに活発になっており、すでにいくつかの新しい蛍光体が実用化の域に達している。

青色発光用としては、当初から用いられている $BaMg_2Al_{16}O_{27}:Eu^{2+}$ のほかに、アルカリ土類金属のクロロアパタイト ($M_{10}(PO_4)_6Cl_2:Eu^{2+}$) 系がさかんに研究されている。後者の蛍光体は、クロロリン酸ストロンチウムをベースとして、ストロンチウムの一部をカルシウム、バリウムによって置換することにより、所望の分光分布と安定な特性を得ようとするものであり、またりん酸の一部をほう酸に置換することにより、さらに輝度向上がはかられることも報告されている³⁴⁾。

一方、アルミン酸バリウム・マグネシウム蛍光体についても、メタルに対するアルミナ比率や Eu 濃度によって分光分布が変化することが報告されている³⁵⁾。前述のように 3 波長形蛍光ランプにおいては、青色発光の分光分布は演色評価数に及ぼす影響が大きいので、効率と演色性の両面から最適化された分光分布で高い量子効率と安定な特性をもつ蛍光体がさらに探索されるであろう。

図 9 にアルミン酸バリウム・マグネシウム系蛍光体の

図 9 BaMg-Aluminate: Eu²⁺ 蛍光体の母体組成と分光分布の関係

図 10 Sr, Ca-Chloro apatite: Eu 蛍光体の母体組成と分光分布の関係

分光分布を、図 10 にストロンチウム・クロロアパタイト系の蛍光体の分光分布を示した。

緑色発光用としては、 $\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Ce} : \text{Tb}^{3+}$ 、 $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19} : \text{Tb}^{3+}$ が当初から用いられているが、新しい母体組成の蛍光体の開発が進んでいる。一つは、Ce, Tb 共付活のりん酸ランタン蛍光体⁴⁰⁾であり、すでに実用化されている。この蛍光体のりん酸基の一部をけい酸基で置換すると、輝度向上が得られることが報告されている³⁴⁾。りん酸ランタン系蛍光体の一つの特長は、長波長側のサブピークが、 $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19} : \text{Tb}^{3+}$ や $\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Ce} : \text{Tb}^{3+}$ 蛍光体よりもやや高いために、同一色度点の 3 波長形蛍光ランプを得るのに、最も高価な赤色発光の $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ 蛍光体の混合量を少なくすることができることである。しかし反面、

図 11 各種緑色蛍光体の分光分布

わずかではあるが演色評価数の低下を生ずる。緑色発光用蛍光体としては、ほう酸ガドリニウム系蛍光体も実用化有望な蛍光体として研究が進められている。ほう酸塩系としては $\text{Gd}_3\text{BO}_6 : \text{Tb}^{3+41)}$ および $\text{MgGdB}_5\text{O}_{10} : \text{Ce} : \text{Tb}^{3+42)}$ が報告されており、後者は $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19} : \text{Tb}^{3+}$ を用いた場合よりも、3 波長形蛍光ランプの効率が数%改善されると報告されている。図 11 に各種緑色蛍光体の分光分布を示した。

赤色発光用蛍光体としては、実用化されているのは今のところ $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ に限られている。ハロけい酸ランタン⁴³⁾やほう酸ランタン・マグネシウムなどの研究報告があるが、実用化の域にはなお遠いと考えられる。図 12 に $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ の分光分布を示した。以上述べた 3 波長形蛍光ランプに用いられる蛍光体の一覧表を表 3 にまとめて示した。

図 12 $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ の分光分布

表 3 3 波長形蛍光ランプ用蛍光体の一覧表

種 類	組 成	ピーク波長 (nm)
青色蛍光体	$3\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{SrCl}_2 : \text{Eu}$	447
	$(\text{Sr}, \text{Ca})_{10}(\text{PO}_4)_6 : \text{Cl}_2 : \text{Eu}$	452
	$(\text{Sr}, \text{Ca} \cdot \text{Ba})_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2 \cdot 0.24\text{B}_2\text{O}_3 : \text{Eu}$	452
	$\text{BaMg}_2\text{Al}_{10}\text{O}_{27} : \text{Eu}$	451
緑色蛍光体	$\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Tb}$	543
	$3\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 : \text{Tb}$	543
	$\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19} : \text{Ce}, \text{Tb}$	543
	$\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Ce}, \text{Tb}$	543
	$\text{LaPO}_4 : \text{Ce}, \text{Tb}$	543
	$\text{La}_2\text{O}_3 : 0.2\text{SiO}_2 : 0.9\text{P}_2\text{O}_5 : \text{Ce}, \text{Tb}$	543
	$\text{GdMgB}_5\text{O}_{10} : \text{Ce}, \text{Tb}$	543
赤色蛍光体	$\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}$	611

3 波長形以外に種々提案されている多波長狭帯域発光形用に用い得る蛍光体の開発については、なお将来の課題であり、当面は 3 波長形蛍光ランプの高効率化を意図した蛍光体の開発、改良が中心的に進められていくものと思われる。

3.6 3 波長形蛍光ランプの効率向上

3 波長形蛍光ランプは、開発されたときすでに従来のハロりん酸カルシウム蛍光体を用いた標準形の蛍光ランプと同等の効率を有していた²⁷⁾。ハロりん酸カルシウムは、過

去30年にわたって改良が続けられ、すでにその効率は飽和状態に達している。一方3波長形蛍光ランプに用いられる蛍光体は新しい蛍光体であって、蛍光体自体の改良やこれらの蛍光体に最も適したランプの製造プロセスの改良によって、ランプの効率を大幅に改善できることが十分期待できる。またこれらの蛍光体はいずれも高負荷での特性が優れている³⁷⁾ので、管径を細め、クリプトン系ガスを封入したいわゆる省電力形の蛍光ランプに対しても、きわめて適している。管径25mmの1.2m長サイズで試作的には100lm/Wの効率のランプが得られたことが、すでに報告されている⁴⁵⁾。

日本においても、最初に商品化された3波長形蛍光ランプは、5000Kの色温度であるにもかかわらず、4200Kの標準形白色蛍光ランプと同じランプ効率を有していた²⁸⁾。その後改良が続けられ、JIS¹³⁾ではすでに白色蛍光ランプよりも5%高い光束が定められている。新しい蛍光体の組み合わせにより、さらに高い効率を得られることが次々と報告されており⁴⁶⁾⁴⁷⁾、より高効率への挑戦が活発に続けられている。将来40Wサイズ100lm/Wでを超える蛍光ランプが製品化されることはもはや夢ではない。高周波点灯回路との組み合わせにおいては、システム効率100lm/Wがすでに報告されており¹⁸⁾¹⁹⁾、蛍光ランプは今後ますます高効率光源としての地歩を固めていくことであろう。

4. 蛍光ランプの光源色および演色性区分 JIS の見直し

蛍光ランプの JIS C 7601 の改正に伴って、3波長形蛍光ランプが新しく JIS に記載されたことを一つの契機として、蛍光ランプの光源色、および演色性の区分について大幅な JIS の見直しが行なわれた。この改正原案は照明学会が依頼されて作成したものであって、いずれ本学会誌にも改正に至った経過が詳細に報告されるものと思われるので、ここでは主要点についてだけ述べる。

今回の改正では、

(1) 従来の蛍光ランプの色度区分 JIS Z 9112 と演色性区分が統合され、改めて蛍光ランプの光源色および演色性区分 JIS Z 9112 として制定された。

(2) 可能な限り IEC 規格との整合がはかられ、従来に比べ各光源色の色度範囲が狭くなり、また各色度区分のゾーンが互いに隣接しないように確実に区分された。

(3) 5000K を中心とする昼白色の光源色 N が新たに制定されるとともに、温白色 WW 30 のかわりに 2600 から 3150 K に及ぶ範囲が電球色 L として制定された。

(4) 従来演色性区分による種類の名称については、普通形のほかは、DL 形、SDL 形などのように記号を流用していたが、演色 A、演色 AA、演色 AAA が、DL、SDL、EDL に対応するものとして制定された。

(5) 新しく狭帯域発光形蛍光ランプが用語に加えられ、3波長形蛍光ランプが、従来の演色性区分とは異なったカテゴリーのランプとして制定された。これは3波長形蛍光

ランプのもつ高い効率と演色性、物体色を鮮やかに見せる照明効果など、従来の蛍光ランプと異なった特長をもっていることが認められたためである。また3波長形蛍光ランプの分光分布特性として445~475、525~555 および 595~625 nm の3波長域内の放射束が、380~780 nm の波長域の全放射束の50%以上占めなければならないことが定められた。

図 13 光源色の色度範囲

表 4 広帯域発光形蛍光ランプの演色評価数の最低値

演色性の区分	光源色の種類	記 号	演色評価数の最低値							
			R _a	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅
普通形	昼光色	D	70							
	昼白色	N	65							
	白色	W	60							
	温白色	WW	55							
	電球色	L	50							
演 色 A	昼光色	N-DL	75							65
	電球色	L-DL	65							50
演 色 AA	昼光色	D-SDL	88	76						88
	昼白色	N-SDL	86	72						86
	白色	W-SDL	84	68						84
	温白色	WW-SDL	82	64						82
演色 AAA	昼白色	N-EDL	95	88	88	93	90	93	93	93
	電球色	L-EDL	90	80	78	85	78	85	90	88

表 5 狭帯域発光形蛍光ランプの演色評価数および3波長域放射束比の最低値

演色性の区分	光源色の種類	記 号	演色評価数の最低値		3波長域放射束比の最低値 r _t (%)
			R _a	R ₁₅	
3波長域発光形	昼白色	EX-N	80	80	50
	電球色	EX-L	78	78	50

図 13 に新しく制定された光源色の色度範囲、表 4、表 5 に演色性区分の一覧表を示した。

5. あ と が き

以上蛍光ランプの分野における最近の進歩について、いわゆる省電力設計による効率向上と、新しい希土類蛍光体による3波長形蛍光ランプに焦点をしばってまとめてみた。今回はふれなかったが、新しい蛍光体による演色 AA A の EDL 蛍光ランプの特性向上や、OA 機器を中心とする新しい用途展開など、蛍光ランプの進歩にはめざましいものがある。さらに今後も活発な研究、開発が続けられていくものと思われ、その成果を期待したい。

参考文献

- (1) Evans, G. S.: Light. Des. Appl., July (1974) 10
- (2) Someya, A. et al: CIE Kyoto 1979
- (3) 竹田: 照学誌 44-5 (昭35) 219
- (4) Waymouth J. F.: Sylvania Technologist 9-4 (1956) 102
- (5) Conuington, E. J.: Illum. Engng. 66 (1971) 159
- (6) Bessone, C. S. et al: IES Tech. Conf. Preprint (1980)
- (7) 梶原ほか: 照学誌 66-4 (昭57) 144
- (8) 広田ほか: 昭51照学全国大会 (昭51) 10
- (9) 小玉ほか: 昭53照学東京支部大会 (昭53) 3
- (10) 大塚ほか: 昭49照学全国大会 (昭49) 5
- (11) 池田ほか: 東芝レビュー 33-4 (昭53) 314
- (12) 向井ほか: 昭56照学全国大会 (昭56) 7
- (13) JIS C 7601-1982
- (14) Internat. Lighting Rev. 29-2 (1978) 35
- (15) Hammer, E. E. et al: IES Tech. Conf. Preprint (1979)
- (16) Light. Des. Appl., Dec (1982) 22
- (17) Bessone, C. S. et al: IES Tech. Conf. Preprint (1982)
- (18) 延原ほか: 昭58照学全国大会 (昭58) 35
- (19) 四宮ほか: 昭58照学全国大会 (昭58) 36
- (20) 延々ほか: 照学誌 63-5 (昭54) 34
- (21) 淵田ほか: 照学誌 65-10 (昭56) 56
- (22) 森ほか: 照学誌 65-2 (昭56) 69
- (23) Thornton, W. A.: J. Opt. Soc. Am. 62-2 (1972) 191
- (24) Koedam, M. et al: Lighting Res. Tech. 3 (1971) 205
- (25) Haft, H. H. et al: J. Illum. Engng. Soc. 2-1 (1972) 29
- (26) Verstegen, J. M. P. J.: J. Electrochem. Soc. 121-12 (1974) 1623
- (27) Verstegen, J. M. P. J. et al: J. Electrochem. Soc. 12-12 (1974) 1627
- (28) 神谷ほか: 昭53照学全国大会 (昭53) 12
- (29) 東芝レビュー 38-4 (1983) 372
- (30) 大久保ほか: 昭56照学全国大会 (昭56) 9
- (31) 金谷ほか: National tech. Rep. 23-4 (1977) 584
- (32) 森: 照学誌 62-12 (昭53) 621
- (33) Opstelten, J. J. et al: Philips tech. Rev. 35 (1975) 361
- (34) 木村ほか: 東芝レビュー 37-2 (昭57) 110
- (35) 岩間ほか: National tech. Rep. 27-3 (1981) 37
- (36) Ter Vrugt, J. W. et al: Light. Res. Tech. 7-1 (1975) 23
- (37) 神谷ほか: National tech. Rep. 27-3 (1981) 339
- (38) Walter, W.: J. IES January (1978) 66
- (39) 神谷ほか: 昭53照学全国大会 (昭53) 10
- (40) 中島ほか: 第186回蛍光体同学会講演予稿 (1981) 1
- (41) 谷水ほか: 第192回蛍光体同学会講演予稿 (1982) 21
- (42) de Hair, J. Th. W. et al: 3rd International Symposium on the Science and Technology of Light Sources (1983) No. 54
- (43) Lehmann, W. et al: J. Electrochem. Soc. 125-3 (1973) 445
- (44) Fouassier, A. et al: J. Luminescence 23-Nos. 3, 4 (1981) 405
- (45) Vrenken, L. E.: Lighting Res. Technol. 10-3 (1978) 161
- (46) Nagamoto, M. et al: I.E.S. Tech. Conf. Preprint (1982)
- (47) 村上ほか: 三菱電機技報 57-2 (昭58) 129

(受付1983年7月6日)